

**Влияние апериодической составляющей затухающего тока в цепях ТТ после отключения выключателя на работу УРОВ.**

Примем, что ток затухает по экспоненциальному закону

$$i(t) = I_k \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

где  $I_k$  - ток КЗ, существовавший перед отключением, для удобства примем его за 1

В микропроцессорных терминалах РЗА применяется, как правило, Фурье-фильтр с окном 0.02 с или подобные ему по амплитудочастотным характеристикам алгоритмы

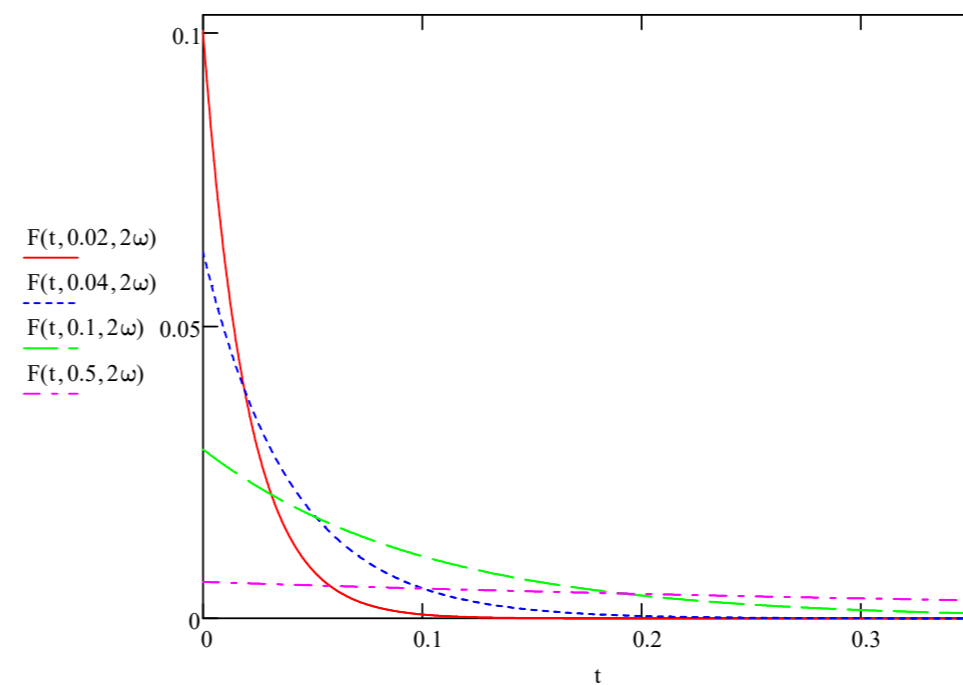
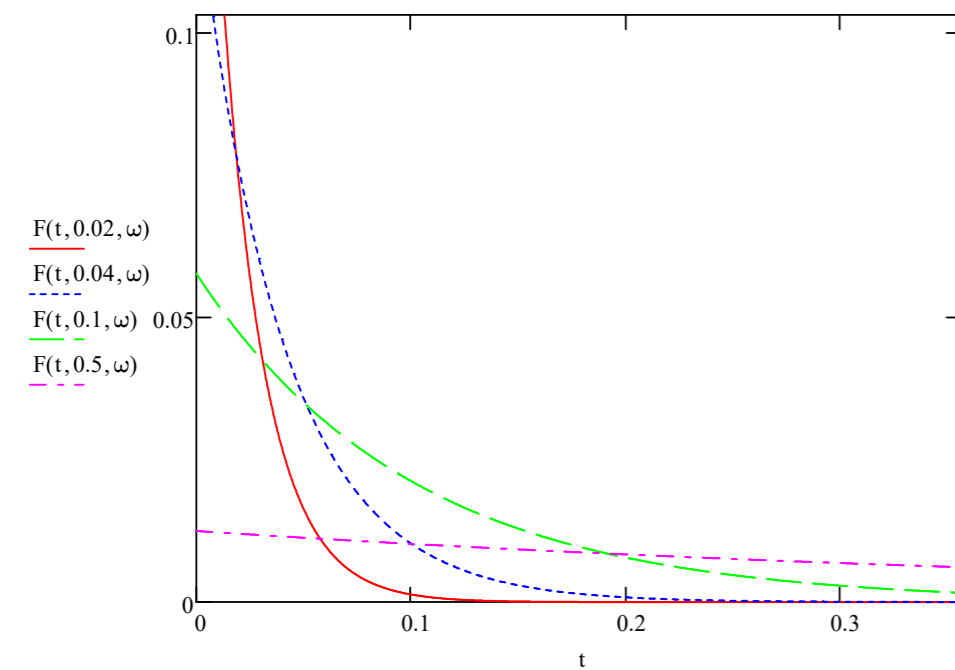
Формула Фурье-фильтрации основывается на выражении

$$I_{dft}(t_1, T_a) = \frac{2 \cdot j}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} i(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt$$

В терминалах РЗА этот интеграл считается численно (обычно метод левых прямоугольников), здесь для удобства примем его в аналитической форме  
Рассчитаем значение сигнала в момент времени  $t_1$  от отключения выключателя

$$j := \sqrt{-1} \quad f := 50 \quad T_a := \frac{1}{f} = 0.02 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$F(t_1, T_a, \omega) := \left| \frac{2 \cdot j}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt \right|$$

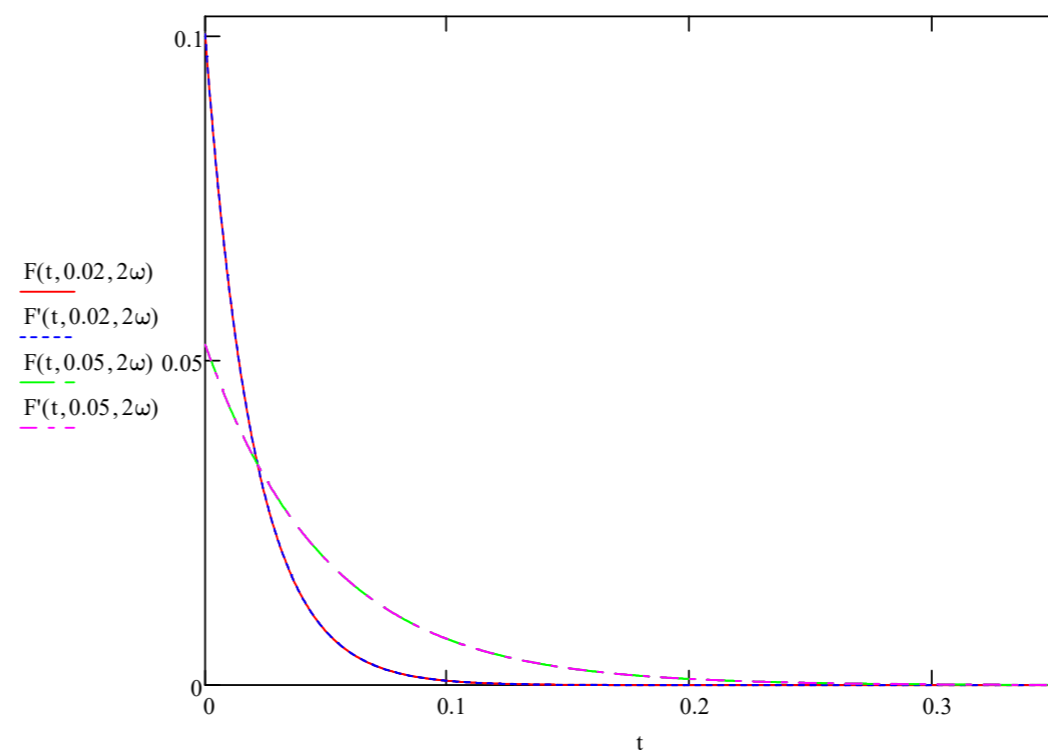
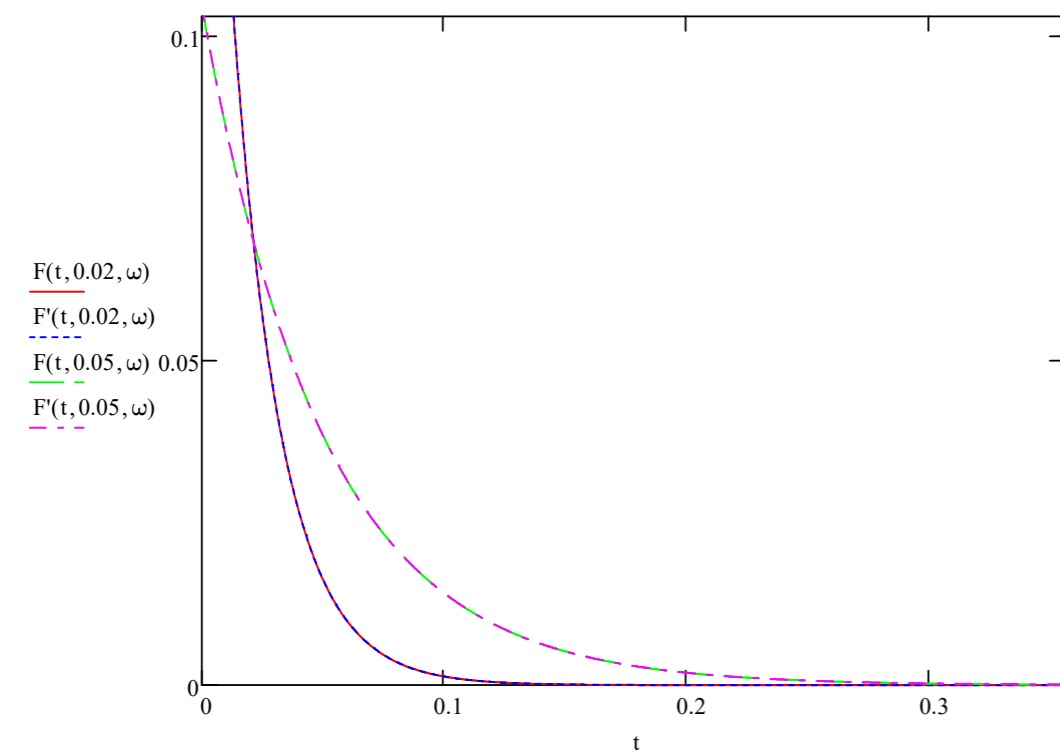


Сделаем необходимые преобразования, взяв интеграл аналитически. Делаем в наиболее общем виде, для k-й гармоники.  $t_1=0$  это спустя 0.02 с после КЗ (время отсчитывается от  $t=0.02$  с)

$$\frac{2 \cdot j}{T} \int e^{\frac{-t}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt = \frac{2 \cdot j}{T} \cdot \frac{e^{\frac{-t}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t}}{\frac{1}{T_a} + \omega \cdot j} = \frac{-2 \cdot j}{T \cdot \left(\frac{1}{T_a} + \omega \cdot j\right)} \cdot e^{\frac{-t}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t}$$

$$\frac{2 \cdot j}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e^{\frac{-t}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt = \frac{-2 \cdot j}{T \cdot \left(\frac{1}{T_a} + \omega \cdot j\right)} \cdot \left[ e^{\frac{-(t_1+T)}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot (t_1+T)} - e^{\frac{-t_1}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t_1} \right] = \frac{-2 \cdot j}{T \cdot \left(\frac{1}{T_a} + \omega \cdot j\right)} \cdot \left( e^{\frac{-T}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot T} - 1 \right) \cdot \left( e^{\frac{-t_1}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t_1} \right)$$

$$F'(t_1, T_a, \omega) := \left| \frac{-2 \cdot j}{T \cdot \left(\frac{1}{T_a} + \omega \cdot j\right)} \cdot \left( e^{\frac{-T}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot T} - 1 \right) \cdot \left( e^{\frac{-t_1}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t_1} \right) \right|$$



$$\left| \frac{-2 \cdot j}{T \cdot \left(\frac{1}{T_a} + \omega \cdot j\right)} \cdot \left( e^{\frac{-T}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot T} - 1 \right) \cdot e^{\frac{-t_1}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t_1} \right| = \left| \frac{-2 \cdot j}{T \cdot \left(\frac{1}{T_a} + \omega \cdot j\right)} \cdot \left( e^{\frac{-T}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot T} - 1 \right) \right| \cdot e^{\frac{-t_1}{T_a}}$$

$$\left( e^{\frac{-T}{T_a}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot T} - 1 \right) = e^{\frac{-T}{T_a}} \cdot (\cos(\omega \cdot T) - j \cdot \sin(\omega \cdot T)) - 1$$

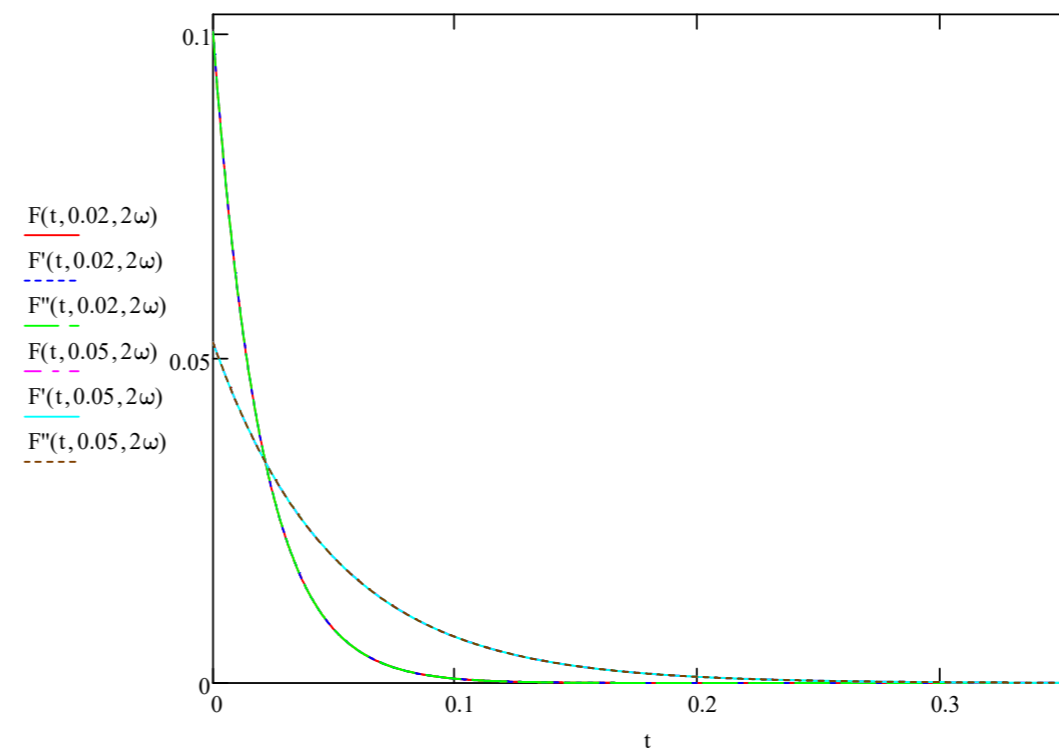
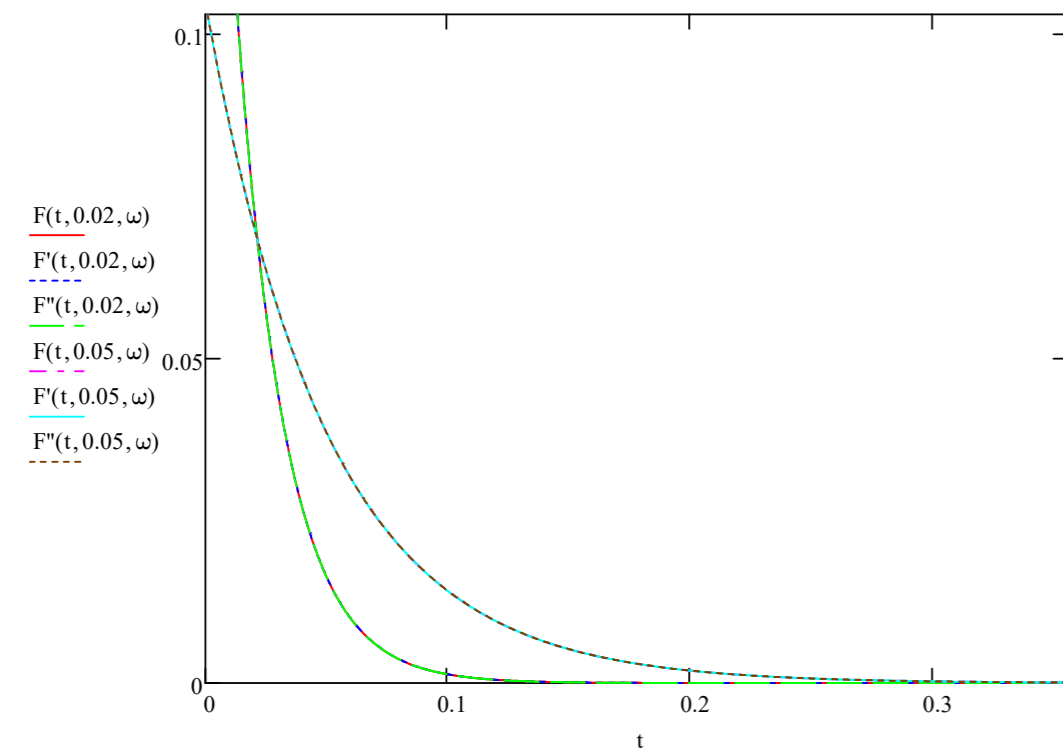
$$\left| \frac{-T}{e^{\frac{T}{Ta}} \cdot (\cos(\omega \cdot T) - j \cdot \sin(\omega \cdot T)) - 1} \right| = \sqrt{e^{-\frac{2 \cdot T}{Ta}} - 2 \cdot e^{-\frac{T}{Ta}} \cdot \cos(T \cdot \omega) + 1}$$

$$\left| \frac{-2 \cdot j}{T \cdot \left(\frac{1}{Ta} + j \cdot \omega\right)} \right| = \frac{2}{\left|\frac{1}{Ta} + j \cdot \omega\right| \cdot T} = \frac{2}{T \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{Ta}\right)^2 + \omega^2}} = \frac{2}{T \cdot \sqrt{\frac{T^2}{Ta^2 \cdot T^2} + \frac{(2\pi \cdot k)^2}{T^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T}{Ta}\right)^2 + (\pi \cdot k)^2}}$$

$$\cos\left(T \cdot 2 \frac{\pi \cdot k}{T}\right) = \cos(2\pi \cdot k) = 1$$

$$\left| \frac{2 \cdot j}{T} \cdot \int_{t1}^{t1+T} e^{\frac{-t}{Ta}} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt \right| = \frac{e^{\frac{-t1}{Ta}}}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T}{Ta}\right)^2 + (\pi \cdot k)^2}} \cdot \sqrt{e^{-\frac{2 \cdot T}{Ta}} - 2 \cdot e^{-\frac{T}{Ta}} \cdot \cos(T \cdot \omega) + 1} = \frac{e^{\frac{-t1}{Ta}}}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T}{Ta}\right)^2 + (\pi \cdot k)^2}} \cdot \sqrt{e^{-\frac{2 \cdot T}{Ta}} - 2 \cdot e^{-\frac{T}{Ta}} \cdot \cos\left(T \cdot \frac{2\pi \cdot k}{T}\right) + 1} = \left[ \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T}{Ta}\right)^2 + (\pi \cdot k)^2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{Ta}}\right) \right] \cdot e^{\frac{-t1}{Ta}}$$

$$F''(t1, Ta, \omega) := \begin{cases} k \leftarrow \frac{\omega}{2 \cdot \pi \cdot f} \\ \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T}{Ta}\right)^2 + (\pi \cdot k)^2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{Ta}}\right) \cdot e^{\frac{-t1}{Ta}} \end{cases}$$

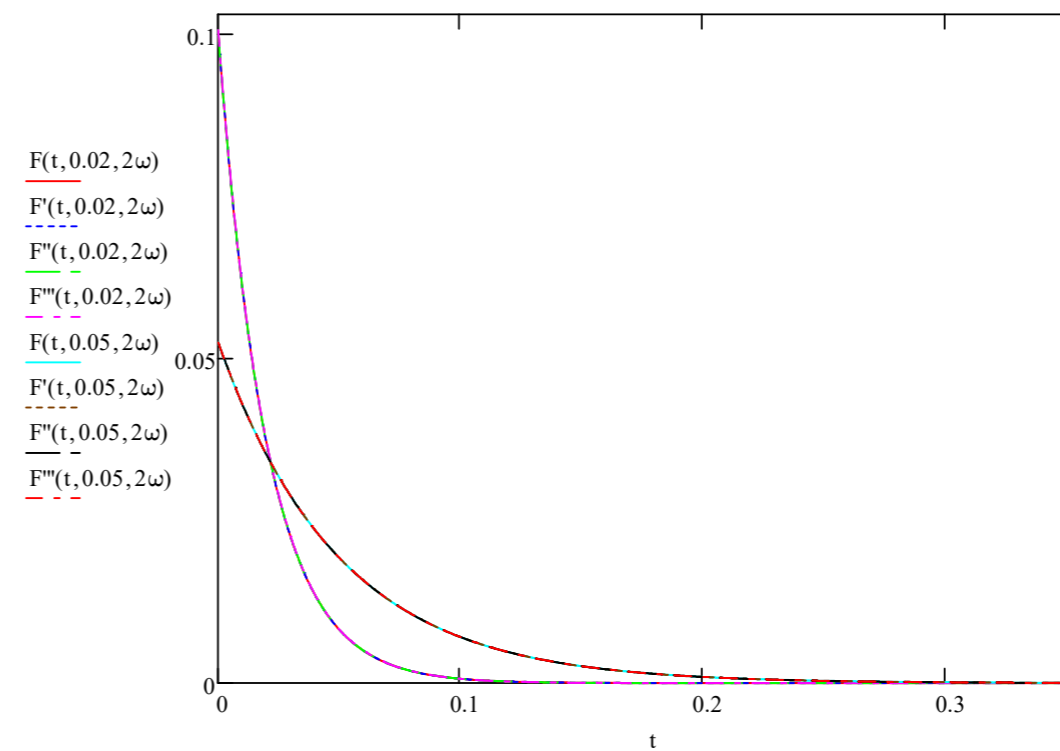
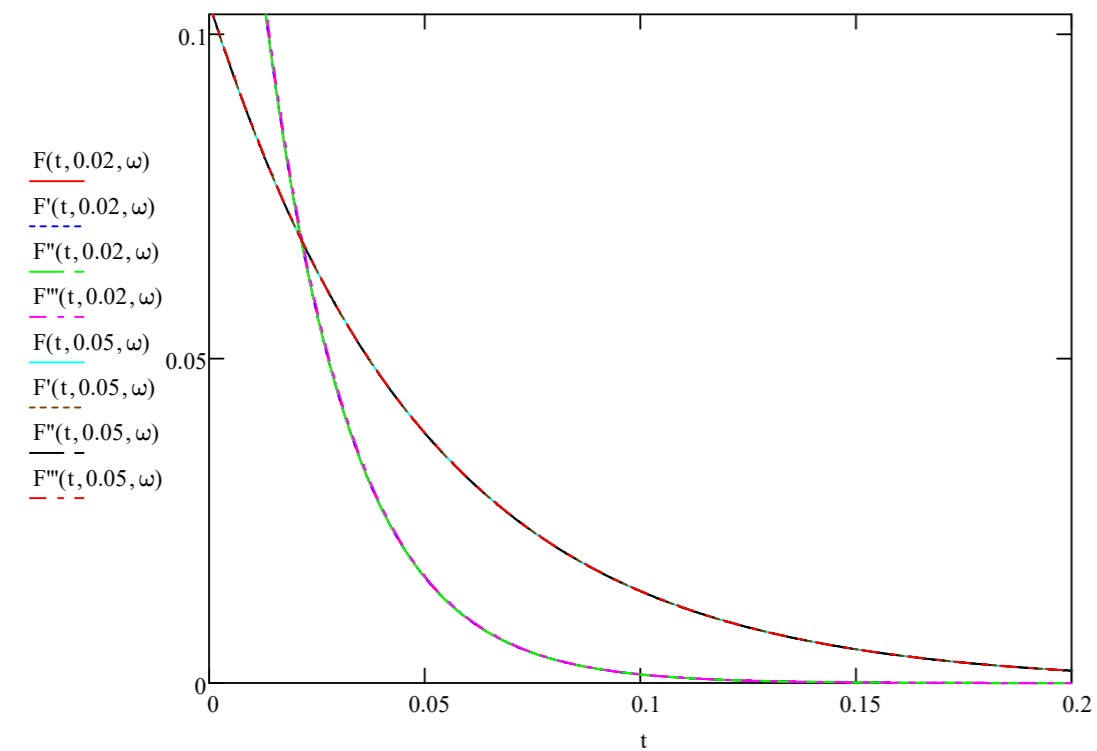


Приближенно, т.к. нас интересуют  $Ta > T$

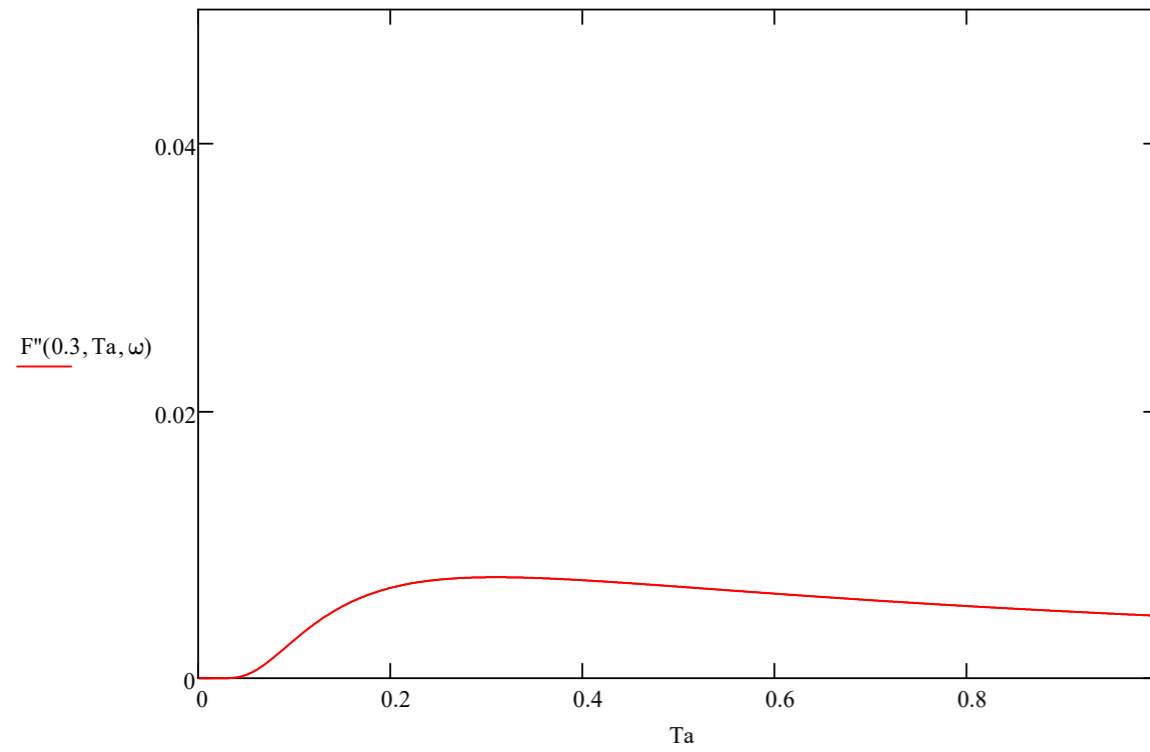
$$\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T}{Ta}\right)^2 + (\pi \cdot k)^2} \quad \text{второе слагаемое } \pi^2 = 9.8696 \text{ при } k=1 \text{ и } (\pi \cdot 2)^2 = 39.47842 \text{ при } k=2, \text{ первое слагаемое при } Ta=0.01 \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{0.02}{0.01}\right)^2 = 1$$

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{0.02}{0.02}\right)^2 = 0.25 \quad \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{0.02}{0.01}\right)^2 = 1 \quad \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{0.02}{0.005}\right)^2 = 4 \quad \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{0.02}{0.005}\right)^2 = 4$$

$$F'''(t1, Ta, \omega) := \begin{cases} k \leftarrow \frac{\omega}{2 \cdot \pi \cdot f} \\ \frac{1}{\pi \cdot k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{Ta}}\right) \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}} \end{cases}$$



$$\frac{d}{dT} \left[ \left(1 - e^{-\frac{T}{Ta}}\right) \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}} \right] = -\frac{T \cdot e^{-\frac{T}{Ta}} \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}}}{Ta^2} - \frac{t1 \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}} \cdot \left(e^{-\frac{T}{Ta}} - 1\right)}{Ta^2}$$



$$\frac{T \cdot e^{-\frac{T}{Ta}} \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}}}{Ta^2} - \frac{t1 \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}} \cdot \left( e^{-\frac{T}{Ta}} - 1 \right)}{Ta^2} = 0$$

$$Ta_{\max}(t1) := -\frac{T}{\ln\left(\frac{t1}{T+t1}\right)}$$

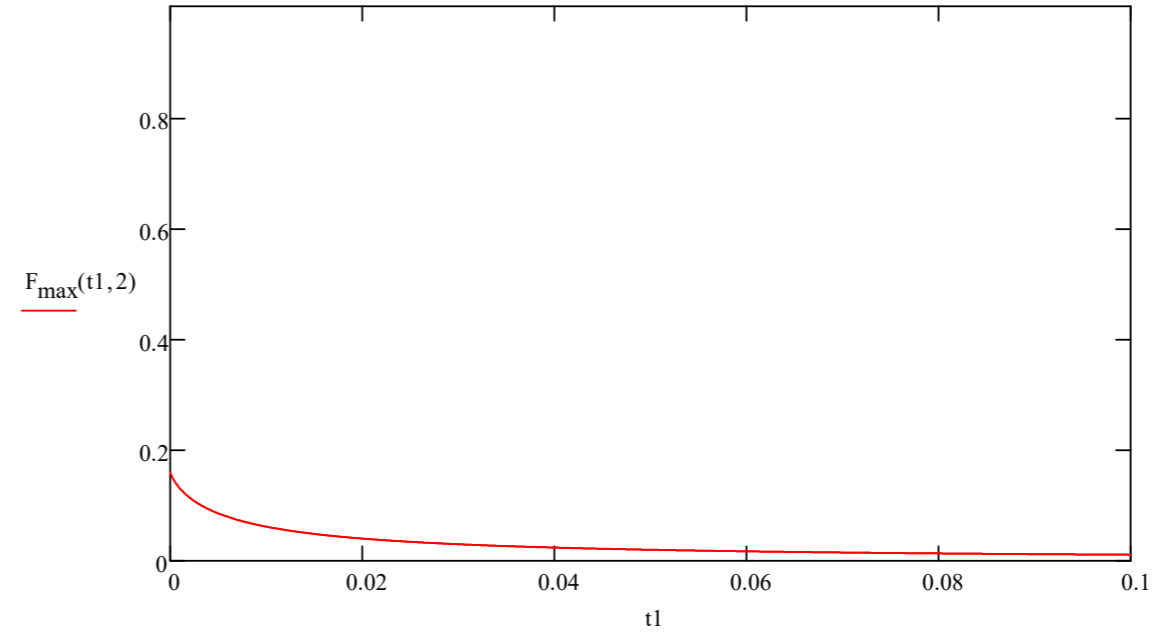
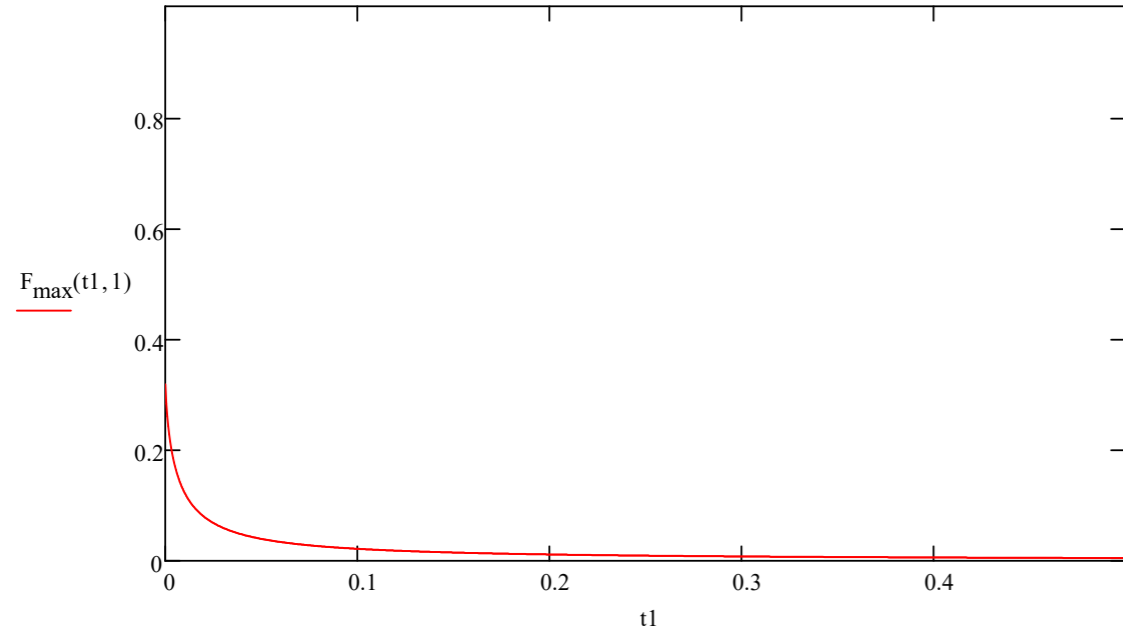
$$F_{\max} = \frac{1}{\pi \cdot k} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{Ta_{\max}}} \right) \cdot e^{\frac{-t1}{Ta_{\max}}} = \frac{1}{\pi \cdot k} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{\ln\left(\frac{t1}{T+t1}\right)}} \right) \cdot e^{\frac{-t1}{\ln\left(\frac{t1}{T+t1}\right)}} = \frac{1}{\pi \cdot k} \cdot \frac{T}{T+t1} \cdot \left( \frac{t1}{T+t1} \right)^{\frac{t1}{T}}$$

$$F_{\max}(t1, k) := \frac{1}{\pi \cdot k} \cdot \frac{T}{T+t1} \cdot \left( \frac{t1}{T+t1} \right)^{\frac{t1}{T}}$$

$$Ta_{\max}(0.3) = 0.30989$$

$$F_{\max}(0.3, 1) = 0.00756$$

$$F_{\max}(0.3, 1) \cdot 100 = 0.75561$$



Таким образом, уставка по току УРОВ с выдержкой времени  $t_{уров}$

$$I_{уров} \geq \frac{1}{\pi} \cdot \frac{T}{T + t_{уров}} \cdot \left( \frac{t_{уров}}{T + t_{уров}} \right)^{\frac{t_{уров}}{T}} \cdot I_{кз} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{0.02}{0.02 + t_{уров}} \cdot \left( \frac{t_{уров}}{0.02 + t_{уров}} \right)^{\frac{t_{уров}}{0.02}} \cdot I_{кз}$$

Единица - это амплитуда тока КЗ, максимальное значение замерного тока на выходе фильтра Фурье при экспоненциально затухающем процессе во вторичных цепях ТТ составляет 0.00756 о.е. или примерно 0.76% от тока КЗ.

Таким образом, уставка по току УРОВ с выдержкой времени 0.3 с должна составлять примерно 1% от тока КЗ. Также учтем, что в токе могла содержаться аperiodическая составляющая, что (с запасом) примерно удваивает ток по отношению к периодической составляющей (таким образом, получаем примерно 1.5%, и уставка д.б. примерно 2%)

$$I_{уров} \geq 0.02 \cdot I_{кз}$$

Если принять, что кратность ТТ составляет примерно 10-30, то, принимая ток КЗ как (10...30)  $I_{ном.ТТ}$ , мы получаем

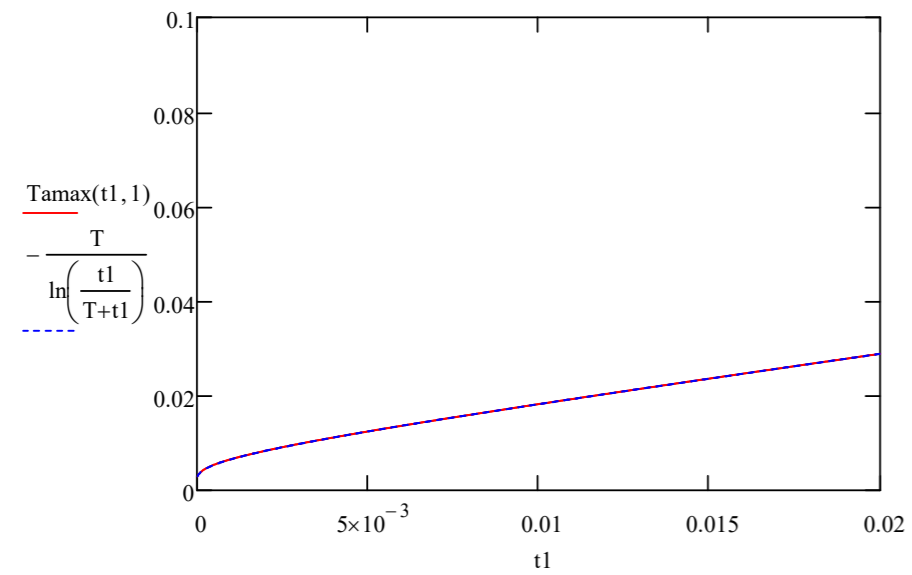
$$I_{уров} \geq 0.02 \cdot (10...30) I_{ном.ТТ} = (0.2...0.6) I_{ном.ТТ}$$

Далее аналогичные соотношения для второй гармоники (чтобы оценить уставку  $I_{2M1}$  для ДЗТ)

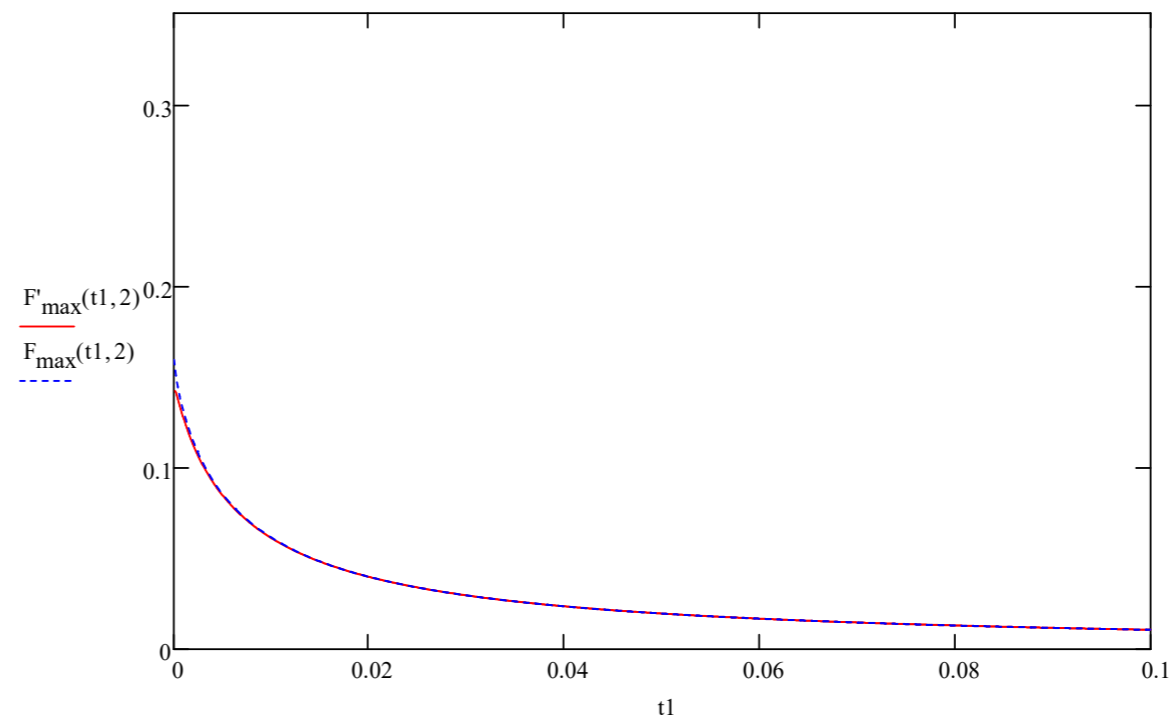
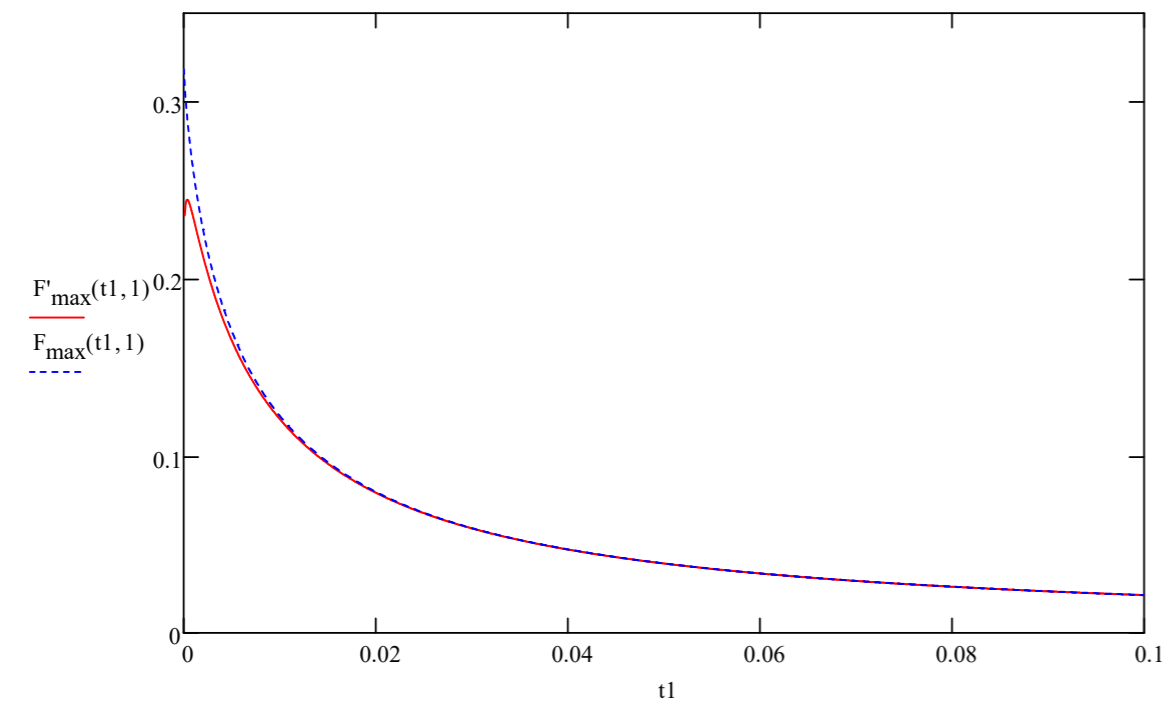
$$D(Ta, t1, T, k) := \frac{2 \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{T+t1}{Ta}} + 2 \cdot T^2 \cdot Ta \cdot e^{-\frac{T+t1}{Ta}} + 2 \cdot T^2 \cdot t1 \cdot e^{-\frac{T+t1}{Ta}} - 2 \cdot T^2 \cdot Ta \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}} - 2 \cdot T^2 \cdot t1 \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}} - 8 \cdot \pi^2 \cdot Ta^2 \cdot k^2 \cdot t1 \cdot e^{-\frac{t1}{Ta}} + 8 \cdot \pi^2 \cdot T \cdot Ta^2 \cdot k^2 \cdot e^{-\frac{T+t1}{Ta}} + 8 \cdot \pi^2 \cdot Ta^2 \cdot k^2 \cdot t1 \cdot e^{-\frac{T+t1}{Ta}}}{Ta^4 \cdot \left( 4 \cdot \pi^2 \cdot k^2 + \frac{T^2}{Ta^2} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

$TOL := 10^{-8}$      $Ta := 0.01$

$$T_{\max}(t1, k) := \begin{cases} \text{root}(D(Ta, t1, T, k), Ta) & \text{if } Ta < 0.5T \\ -\frac{T}{\ln\left(\frac{t1}{T+t1}\right)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

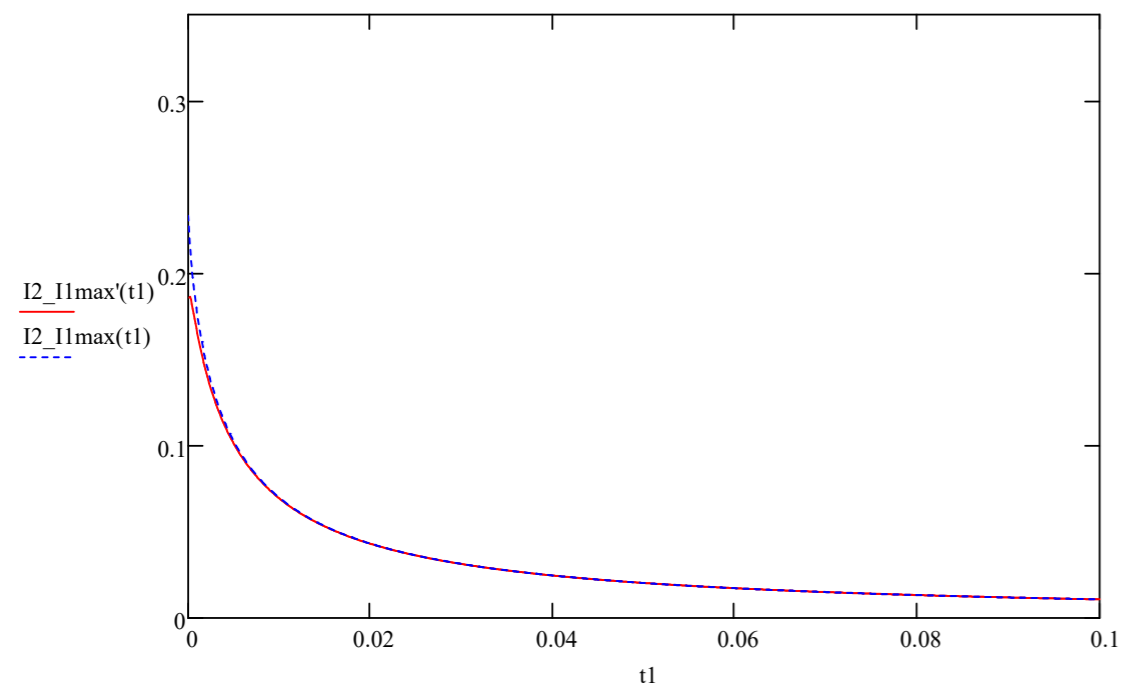


$$F'_{\max}(t1, k) := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{T}{T_{\max}(t1, k)}\right)^2 + (\pi \cdot k)^2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_{\max}(t1, k)}}\right) \cdot e^{-\frac{t1}{T_{\max}(t1, k)}}$$



$$I2\_I1max(t1) := \frac{F_{max}(t1, 2)}{1 - F_{max}(t1, 1)}$$

$$I2\_I1max'(t1) := \frac{F'_{max}(t1, 2)}{1 - F'_{max}(t1, 1)}$$



Таким образом, для исключения возникновения ложных блокировок при КЗ и отсутствии насыщения ТТ, уставка I2/I1 должна быть больше примерно 0.2 (20%). Уставка 0.15 (15%) дает задержку в 0.002 с, уставка 0.1 (10%) дает задержку в 0.005 с. Т.к. будет существовать еще задержка 0.02 с в первый период (там всегда есть I2 из-за переходного процесса в фильтре), то общая задержка в срабатывании ДЗТ из-за наличия блокировки по второй гармонике составит 0.022...0.025 с, в зависимости от уставок I2/I1